

# 一次元振動インテンシティの計測・制御手法に関する研究

|     |   |
|-----|---|
| 著者  | 岩谷 幸雄   |
| 号   | 11  |
| 発行年 | 1998  |
| URL | <a href="http://hdl.handle.net/10097/13035">http://hdl.handle.net/10097/13035</a> |

|               |   |
|---------------|---|
| 氏 名 (本 籍)     | 岩 谷 幸 雄 (秋田県)   |
| 学 位 の 種 類     | 博 士 (情報科学)  |
| 学 位 記 番 号     | 情 第 11 号  |
| 学 位 授 与 年 月 日 | 平 成 11 年 2 月 12 日   |
| 学 位 授 与 の 要 件 | 学位規則第 4 情第 2 項該当  |
| 最 終 学 歴       | 平成 5 年 3 月<br>東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻前期 2 年の課程修了  |
| 学 位 論 文 題 目   | 一次元振動インテンシティの計測・制御手法に関する研究  |
| 論 文 審 査 委 員   | (主 査)<br>東北大学教授 曾 根 敏 夫 東北大学教授 牧 野 正 三<br>東北大学教授 加 藤 正 名 東北大学教授 中 村 信 良<br>(工学研究科)<br>東北大学助教授 鈴 木 陽 一 |

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 序 論

騒音制御の際に問題になる音に、振動として運ばれ最終的に音として放射される個体伝搬音が挙げられる。したがって固体音の構造体伝搬時の伝搬経路を正確に把握し、適切な制御を計画することは重要である。したがって本研究では、一次元構造体中を固体音放射に相関の高い屈曲波によって運ばれる音響エネルギーの流れを示す振動インテンシティに関する計測・制御手法を確立することを目指して研究を行った。

研究をおこなった点は、次の 3 点である。第 1 に、振動インテンシティの物理的挙動を明らかにすることである。これを第 2 章で述べる。第 2 に、振動インテンシティを高精度に計測する技術を確立するための要件を示すことである。これを第 3 章と第 4 章で述べる。第 3 に、振動インテンシティ計測に基づく固体音伝搬の制御手法を検討する。これを第 5 章、第 6 章で述べる。以上である。

### 第 2 章 一次元振動インテンシティの物理的性質

第 2 章では、振動インテンシティの定義を述べ、これらの物理的挙動について解析を行った。はじめに、最もエネルギー吸収を一般的に表し得る境界条件を検討し、機械インピーダンス  $Z_F$  と曲げモーメントインピーダンス  $Z_M$  の二つを与えることにより弾性固定条件を定義した。これにより、半無限長はりのエネルギー吸収について解析した。端におけるエネルギー吸収は、この固有インピーダンスによる終端のとき最も大きくなり、不整合が大きくなれば、吸収は小さくなる。しかし、振動インテンシティはせん断力成分と曲げモーメント成分の二つに分類できるため、一方のインピーダンスの不整合が大きくても、一方の整合が取れていれば、エネルギーの吸収は比較的大きいことを示した。

次に、インテンシティの波動的表現を示し、その成分が進行波が単独で運ぶ成分（遠方場成分）と両端の減衰波の相互作用による成分（近傍場成分）とに分類できることを延べ、前者は、電気回路や単純進行波のエネルギー伝搬から、その挙動が容易に類推できるが、後者は解析する必要があると考え、近傍場成分のはりの長さに対する依存性を詳細に

解析した。その結果一次元振動インテンシティの近傍場成分は、はり長が1波長以上長くなれば、全インテンシティに対してほとんど無視できることを示した。

### 第3章 直接差分法による一次元振動インテンシティの計測

第3章では、これまで提案されてきた振動インテンシティの計測手法について、その種類と利点と欠点を述べた。その上で、音響インテンシティ計測システムとの親和性、簡便性から、Pavićによって提案された直接差分法が最も実用化が期待されるとの立場を述べ、これについて、検討を加えた。第3章で新たに提案・解析した点は以下である。

まず、pavićの4点法では、4つのセンサで近似する3階の微係数の差分近似に伴う誤差が大きくなり、2点法では、遠方場（正負方向の2つの進行波音場）が成り立たなければ手法を用いることができないことを述べた。この欠点改善するために、正負方向の2つの進行波と片端の減衰波で成る片近傍場を仮定し、3階の微係数を2階以下の微係数の線形和で表すことで、用いるセンサを3つにした3点法を新たに定式化した。次に、誤差要因を述べ、これら3つの手法について誤差要因をあらかじめ取り入れたセンサ出力の式を用いて、計測値を与える式を解析的に導出し、第4章での誤差解析の準備を行った。

### 第4章 直接差分法による一次元振動インテンシティの計測誤差

本章では、第3章で導いた式と弾性固定条件などを用いて、直接差分法による一次元振動インテンシティの計測に伴う誤差について検討を加えた。第2章の知見より、両端の減衰波が相互作用するのは、はり長が1波長以下の場合であったため、これよりはり長の場合には端における場は片近傍場である。多くの場合これが成立すると考え、片近傍場における解析を行った。

4点法では、これまで行われた遠方場における解析での遠方場誤差とそれに減衰波付加したことによる近傍場の成分との和になる。したがって、近傍場誤差が遠方場誤差に対して、誤差を増やす方向に作用するのか減らす方向に作用するのかを解析した。その結果、誤差の近傍場成分は、遠方場誤差を増やす作用が強いことが分かった。

2点法による計測では、片近傍場で手法を用いたことに起因するフィールド誤差に対して解析を行った。片近傍場における計測精度を調べると、端から半波長離れた地点の計測では、正しい値で観測できることが分かった。また、従来の研究や経験的な知見としてフィールド誤差が2倍であるとの報告があった。これについて調べて行くと、端における曲げモーメントをゼロにした条件であれば、反射率がどのような値を取ろうとも2倍になることを明らかにした。また、フィールド誤差について弾性固定条件下で調べた結果、端付近では、ゼロに観測されるなどさまざまな値を取る可能性があることを示した。

3点法では、計測に用いる式が非対称であることから、各センサの誤差が測定値に与える影響も異なることが分かった。このうち、真中のセンサについての不整合が一番大きく誤差に影響する。しかし、片近傍場における4点法の偶然誤差と2点法のフィールド誤差に比べると誤差は小さく、高精度な計測が可能であることを示し、本手法が片近傍場の計測に有効であることを示した。

最後に、上記の結果を踏まえ、高精度な計測結果を得るためには、用いるセンサを波長に応じて変更する振動場の選択による一次元振動インテンシティの計測方法を提案した。

### 第5章 一次元振動インテンシティの能動制御の有効性に関する検討

本章では、固体音伝搬制御の一手法として、固体音伝搬の挙動を示す振動インテンシティを直接制御する手法を提案し、その効果と有効性に関して検討を行った。

まず、1次振源と制御振源が1つずつの簡単なモデルを立てて、伝搬するエネルギーを最小化するような最適な制御振源力を解析的に求めた。このとき、これまで検討が行われてきた、ある一点の加速度を制御する効果との差異を弾性固定条件を用いて比較した。その結果、2次振源が端から1.5波長程度離れれば、最適な制御力は等しくなることが分かった。しかし、端に近い点に2次振源をおいた場合、境界条件と制御点の位置によっては、1点制御では、インテンシティを増やす場合があることが分かった。また、提案するように振動インテンシティを直接制御した場合、注目する領域で振動インテンシティは一定値であるため、インテンシティを観測する点によらず、インテンシティの減衰効果

は1点制御と比較して安定したものとなることを明らかにした。

これらのことから、一般に構造体中の曲げ振動の伝搬を制御するには、例え一次元であってもインテンシティを直接制御を施すことが効果的であることを示唆した。

## 第6章 一次元振動インテンシティの適応制御手法に関する研究

本章では、第6章で得られた知見を基に、一次元構造体中の振動インテンシティの適応制御手法の検討を遠方場と近傍場に分けて検討した。

始めに遠方場の場合についてインピーダンスによるインテンシティの表現を示し、遠方場では、機械インピーダンスが曲げモーメントインピーダンスに反比例する性質から、片方の成分を制御すればよいことを示した。これを基に、1点の加速度をゼロに制御する手法（従来法）の他に、2点間の加速度の差をゼロにする手法として遠方場インテンシティ制御法を提案し、提案法の制御効果をコンピュータシミュレーションにより検証した。その結果、高い周波数で遠方場が仮定できるような場合には提案法が効果的であることが分かった。しかし、低い周波数では、遠方場の仮定が成り立たなくなるために減衰量は小さいものの、1点制御の方が相対的に効果的であった。

次に、近傍場を仮定した手法について検討した。直接差分法を用いた瞬時インテンシティの観測に基づく適応アルゴリズムを提案し近傍場インテンシティ制御法と名付けた。この手法の有効性を示すために、コンピュータシミュレーションと実験を行った。その結果、近傍場と考えられる低い周波数において、提案法によって振動インテンシティが大きく減衰することが確認され、その有効性を示すことができた。

## 第7章 結 論

第7章では、本論文の結論として、本論文の内容を要約し、さらなる研究への指針を述べた。

## 論文審査の結果の要旨

固体中を伝搬して音のエネルギーを運ぶ固体音は、距離による減衰が小さく、伝搬路が明確でない場合が多いことから、騒音制御を行う上で困難な問題を引き起こすことが少なくない。そのため、固体音伝搬を正確に計測し、制御するための技術開発が求められている。著者は、特に騒音と密接な関係を持つ屈曲波に着目し、一次元の構造体中を伝搬する屈曲波の振動インテンシティ（構造体の単位幅を通過するパワー）の計測手法、誤差解析、並びに制御手法の研究を行ってきた。本論文は、その研究成果をまとめたもので、全編7章からなる。

第1章は、序論である。

第2章では、まず、一次元の構造体が一般的な弾性固定条件によって終端されている場合の、端部におけるエネルギー吸収を求める解析式を与えた。この式に基づいて、端部付近に現れる振動インテンシティの近傍場成分について検討し、はりの長さが1波長以上になれば、全インテンシティに対して近傍場成分が無視できることを明らかにしている。これは、一次元の屈曲波による振動インテンシティの性質を、端部におけるエネルギー吸収をも含めた形で、初めて詳細に明らかにしたものとして評価できる。

第3章では、振動インテンシティの高精度な計測法について検討している。従来の計測手法（4点法）には、3階微係数の差分近似により大きな誤差が発生するという問題がある。これを解決するため、片近傍場が仮定できる場合には、2階の微係数を求めれば十分であることを示し、具体的な計測法として3点法を提案している。また、振動センサ間の位相差などの誤差要因をパラメータとして含む計測値の式を、解析的に導いている。これらは、振動インテンシティ計測の実用化に寄与するものとして高く評価できる。

第4章では、前章で導いた式と一般的な弾性固定条件を用いて片近傍場における誤差解析を行っている。その結果、従来法と、本論文で提案した3点法の計測誤差の特性を明らかにしており、これは計測の実用化における有用な知見として評価できる。

第5章では、屈曲波による振動伝搬を制御する方法として、振動インテンシティの観測値に基づく能動制御法について検討している。その結果、振動インテンシティを最小化する制御手法は、ある1点での加速度を最小化する従来の手法に比較して、制御点の位置によらず安定で、大きな減衰量を与えることを示している。このように、振動の伝搬制御を、振動インテンシティに基づいて行うことの有用性を確認したことは、興味深い結果である。

第6章では、一次元振動インテンシティの観測値に基づいて、実際に振動伝搬の能動制御を行うための適応制御手法を検討している。その結果、近傍場において4点法を用い、周波数領域で振動インテンシティを制御するアルゴリズムを提案し、従来法に比べ7 dB高い約14 dBの減衰性能が得られることを示している。これは、振動伝搬の有効な制御手法の提案として、高く評価できる。

第7章は、結論である。

以上要するに、本論文は、一次元屈曲波による固体音伝搬について、その高精度な計測手法を与えると共に、振動伝搬の効果的な能動制御手法について検討したもので、システム情報科学及び騒音制御工学の発展に寄与するところが少ない。

よって、本論文は、博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。